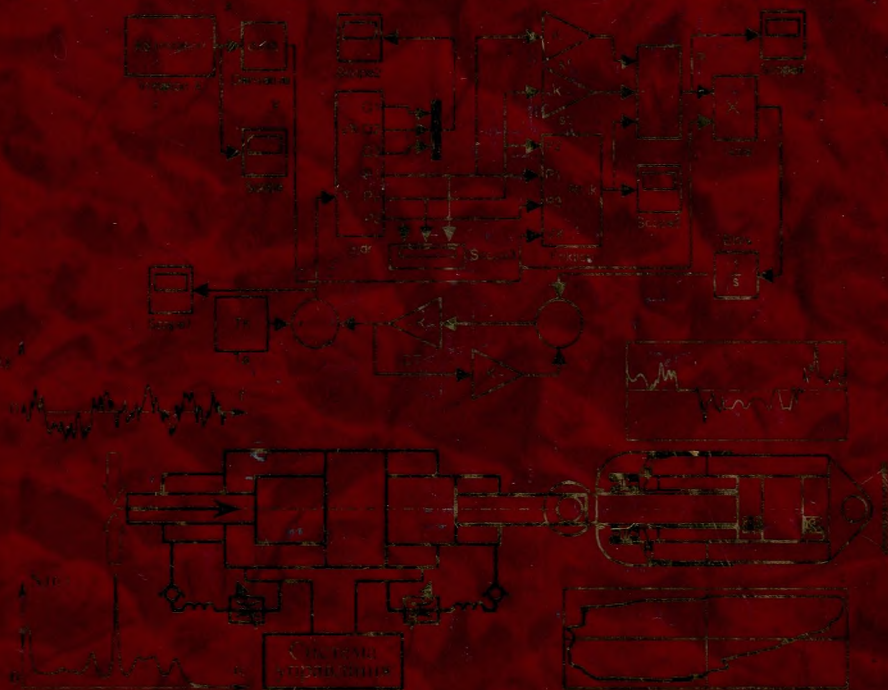


В.Б.СТРУТИНСЬКИЙ О.В.КОЛОТ

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ
СТОХАСТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ
У СИСТЕМАХ ПРИВОДІВ



В.Б.СТРУТИНСЬКИЙ, О.В.КОЛОТ

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ
СТОХАСТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ
У СИСТЕМАХ ПРИВОДІВ**

Монографія

2005

УДК. 510:621.9

С 87

С 87 Струтинський В.Б., Колот О.В. Математичне моделювання стохастичних процесів у системах приводів: Монографія. - Краматорськ: ЗАТ “Тираж-51” 2005. - 530 с.

ISBN 966-302-540-9

Монографія узагальнює багаторічний доробок авторів у галузі математичного моделювання стохастичних процесів у системах гідроприводу. В ній розглянуті основні причини випадкових змін характеристики гідроприводу, методи їх розрахунку та цілеспрямованих змін з метою підвищення ефективності системи приводів.

В монографії також викладено результати дослідно-конструкторських робіт по розробці, виготовленню та апробації прогресивного стендового обладнання для діагностичних випробувань гідравлічних амортизаторів залізничних вагонів.

Розроблені методи математичного моделювання викладено в логічній послідовності. Вони застосовані для дослідження конкретних систем приводів. Методи математичного моделювання базуються на застосуванні засобів сучасних математичних пакетів MathCAD і Matlab останніх версій.

Монографія розрахована на широке коло фахівців машинобудівних галузей промисловості, науковців, спеціалістів-практиків, аспірантів та студентів, зокрема студентів-магістрантів напрямку “Інженерна механіка”.

Іл.: 407. Табл.: 40. Бібліогр. 214 назв.

Рецензенти:

Саленко О.Ф. - д.т.н., професор, завідувач кафедри верстатів і верстатних комплексів Кременчуцького державного політехнічного університету.

Сахно Ю.О. - д.т.н., професор кафедри металорізальних верстатів та інструментів Чернігівського державного технологічного університету.

Кафедра гідрогазових систем повітряних суден Національного авіаційного університету України.

ISBN 966-302-540-9

УДК. 510:621.9

© Струтинський В.Б., 2005

© Колот О.В., 2005

ЗМІСТ

Вступ.....	2
ЧАСТИНА І. ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ МОДЕЛЮВАННЯ ВИПАДКОВИХ ВЕЛИЧИН І ВИПАДКОВИХ ПРОЦЕСІВ.....	5
Розділ 1. Математичне моделювання випадкових величин.....	5
1.1. Характеристики випадкових величин та генерування випадкових чисел (псевдовипадкових чисел) за допомогою математичних пакетів.....	5
1.1.1. Дискретні випадкові величини.....	5
1.1.2. Засоби пакету MathCAD для обробки випадкових величин.....	6
1.1.3. Біноміальний закон розподілу.....	7
1.1.4. Геометричний розподіл і розподіл Пуассона.....	9
1.1.5. Неперервні випадкові величини, їх статистичні характеристики.....	11
1.1.6. Нормальний закон розподілу.....	14
1.1.7. Рівномірний закон розподілу.....	16
1.1.8. Експоненціальний закон розподілу, закон розподілу Релея та логарифмічно нормальний розподіл.....	18
1.1.9. Гамма та бета-розподіли.....	20
1.1.10. Розподіли Вейбула, χ^2 (хі квадрат), Ст'юдента і Фішера.....	23
1.2. Визначення статистичних характеристик випадкових величин, дисперсійний аналіз.....	26
1.2.1. Числові характеристики статистичної вибірки Гамма та бета-розподіли.....	26
1.2.2. Вибіркова функція розподілу, гістограма виборки.....	27
1.2.3. Оцінка закону розподілу на основі теореми Колмогорова.....	31
1.2.4. Знаходження закону розподілу, точкові оцінки параметрів.....	34
1.2.5. Оцінка параметрів у вигляді довірчих інтервалів.....	35
1.2.6. Перевірка гіпотез про наявність нормального закону розподілу за допомогою критерію Пірсона χ^2 (хі квадрат).....	37
1.2.7. Приклад перевірки гіпотези про нормальний закон розподілу випадкової величини.....	38
1.3. Математичні моделі систем випадкових величин, кореляційний та регресійний аналіз.....	40
1.3.1. Система двох дискретних випадкових величин, кореляційний момент.....	40
1.3.2. Система двох неперервних випадкових величин, функція розподілу, щільність розподілу.....	42
1.3.3. Моменти розподілу двох неперервних випадкових величин.....	44
1.3.4. Система двох випадкових величин з нормальним законом розподілу.....	46
1.3.5. Статистичні характеристики системи довільного числа випадкових величин.....	48
1.3.6. Встановлення стохастичного взаємозв'язку випадкових величин кореляційний та регресійний аналіз.....	49

1.3.7. Лінійні регресійні моделі випадкових величин (функції intercept, slope).....	51
1.3.8. Поліноміальні регресійні моделі (функції regress, interp).....	52
1.3.9. Згладжування випадкових точкових значень параметрів (функції loess, ksmooth medsmooth, supsmooth).....	56
Розділ 2. Математичне моделювання випадкових процесів.....	59
2.1. Аналіз випадкових процесів.....	59
2.1.1. Статистичні характеристики перерізу випадкового процесу.....	59
2.1.2. Кореляційна функція випадкового процесу.....	61
2.1.3. Кореляційний аналіз двох процесів.....	64
2.1.4. Елементарні випадкові функції, канонічний розклад випадкового процесу.....	65
2.1.5. Стаціонарні випадкові процеси, математична модель кореляційної функції.....	67
2.1.6. Внутрішня структура процесу, лінійчатий спектр дисперсії.....	69
2.1.7. Спектральна щільність випадкового процесу та її загальна математична модель.....	71
2.1.8. Ергодичні випадкові процеси.....	73
2.1.9. Приклад знаходження кореляційної функції ергодичного процесу, заданого масивом значень.....	74
2.1.10. Знаходження кореляційної функції засобами пакета MathCAD.....	76
2.2. Синтез типових випадкових процесів синусоїдального виду.....	77
2.2.1. Загальні принципи синтезу стохастичних вхідних параметрів систем.....	77
2.2.2. Синтез процесів із постійними випадковими складовими.....	78
2.2.3. Синтез випадкових процесів із періодичними реалізаціями, що є гармонічними (синусоїдальними) функціями часу.....	79
2.2.4. Полігармонічний випадковий процес.....	82
2.2.5. Синтез випадкових процесів, реалізаціями яких є синусоїдальні функції змінної частоти.....	84
2.2.6. Полігармонічні процеси, складені із синусоїд змінної частоти.....	86
2.3. Синтез випадкових процесів спеціального виду.....	89
2.3.1. Випадкові процеси у вигляді послідовно діючих імпульсів.....	89
2.3.2. Випадкові процеси, реалізації яких описуються кусково-постійними функціями.....	93
2.3.3. Синтез випадкових процесів за допомогою ортогональних кусково- постійних функцій.....	95
2.3.4. Типовий розрахунковий випадковий процес у вигляді "білого" шуму.....	98
2.3.5. Синтез випадкових процесів з обмеженим спектром.....	99
2.3.6. Випадкові послідовності. Марківські випадкові процеси.....	101
2.3.7. Синтез випадкових процесів Пуассона.....	102
2.3.8. Процес, який породжується випадковою вибіркою, та дробовий ефект.....	105

ЧАСТИНА II. ПРИЧИНИ ВИНИКНЕННЯ ВИПАДКОВИХ ЗМІН	
ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕМЕНТІВ ГІДРОПРИВОДУ	107
Розділ 3. Гідродинамічні процеси, які обумовлюють випадкові зміни параметрів гідроприводу	107
3.1. Статичні випадкові процеси в гідроприводі.....	107
3.1.1. Деформативні властивості рідини.....	107
3.1.2. Нерозчинене повітря в робочій рідині гідроприводу.....	109
3.1.3. Деформативні властивості рідини при наявності нерозчиненого повітря.....	113
3.1.4. Чистота робочої рідини.....	115
3.1.5. Облітерація в пристроях гідроприводу.....	117
3.2. Випадкові дисипативні гідродинамічні процеси.....	121
3.2.1. Рух в'язкої рідини в конфузорі та дифузорі.....	121
3.2.2. В'язкий відрив ламінарного граничного шару від стінки.....	126
3.2.3. Специфічні випадки просторового вихрового руху рідини.....	129
3.2.4. Вихрова пелена при течії між двома паралельними стінками.....	131
3.2.5. Відривні явища інерційного характеру в елементах гідроприводу.....	133
3.3. Стохастичні гідродинамічні процеси.....	137
3.3.1. Турбулентний рух рідини, механізми турбулентності.....	137
3.3.2. Випадкові зміни параметрів турбулентного руху рідини.....	139
3.3.3. Кавітаційні явища в рідкому середовищі.....	141
3.3.4. Випадкові імпульсні зміни параметрів гідроприводу, обумовлені гідродударними процесами.....	144
3.3.5. Хвильові явища в трубопроводах, обумовлені в'язкістю рідини.....	149
Розділ 4. Випадкові зміни параметрів статичних і динамічних характеристик елементів гідроприводу	151
4.1. Статичні характеристики допоміжної гідроапаратури.....	151
4.1.1. Випадкові зміни характеристик дроселів.....	151
4.1.2. Характеристики реульованих дроселів (дроселі з регулятором).....	155
4.1.3. Клапанні пристрої та випадкові зміни їх характеристик.....	158
4.2. Стохастичні параметри статичних характеристик керуючих дроселюючих гідророзподільників.....	164
4.2.1. Конструктивна реалізація керуючої гідроапаратури.....	164
4.2.2. Дросельні гідророзподільники із плоским золотником та розподільники інших типів.....	167
4.2.3. Причини та характер випадкових змін параметрів дроселюючих гідророзподільників та конструктивні заходи по їх компенсації.....	169
4.2.4. Гідравлічні характеристики ідеального чотирьох дросельного гідророзподільника.....	171

4.2.5. Особливості характеристик реальних золотникових дросельних розподільників.....	175
4.2.6. Гідравлічні характеристики реальних дроселюючих гідророзпо дільників.....	179
4.3. Стохастичні динамічні характеристики елементів гідроприводу.....	181
4.3.1. Математичний опис елемента при випадкових збуреннях на вході.....	181
4.3.2. Математичний опис елемента гідроприводу при випадкових змінах його внутрішніх параметрів і детермінованих входах.....	186
4.3.3. Математичний опис елемента гідроприводу при випадкових змінах входних параметрів і наявності випадкових збурень на вході.....	190
4.3.4. Динамічні характеристики дроселюючого розподільника із зворотнім зв'язком.....	194
Розділ 5. Характеристики випадкових процесів у гідроприводі.....	198
5.1. Стохастичні дисипативні характеристики гідроприводу.....	198
5.1.1. Режими руху рідини в трубопроводах, втрати енергії.....	198
5.1.2. Складні трубопроводи, оцінка порядків величин коефіцієнтів.....	203
5.1.3. Зосередження дисипативних та інерційних параметрів гідросистем.....	206
5.1.4. Експериментальне визначення випадкових змін дисипативних параметрів гідросистеми приводу стенда.....	209
5.1.5. Геометричні параметри ущільнень та їх деформативність.....	213
5.1.6. Процеси в ущільненнях рухомих з'єднань, витрати рідини.....	216
5.1.7. Сили тертя в ущільненнях рухомих з'єднань.....	218
5.1.8. Пристрої гальмування гідроприводу.....	221
5.1.9. Стохастичні характеристики системи гальмування гідроциліндра.....	224
5.2. Випадкові деформативні та інерційні параметри гідроприводу.....	229
5.2.1. Приведений модуль пружності гідроприводу.....	229
5.2.2. Нелінійні характеристики деформативності еластичних трубопроводів (шлангів).....	231
5.2.3. Деформативні властивості ущільнень.....	233
5.2.4. Експериментальне визначення випадкових деформативних параметрів приводу в статичному режимі.....	235
5.2.5. Експериментальне визначення випадкових деформативних параметрів приводу при його циклічному усталеному русі.....	238
5.2.6. Експериментальне визначення стохастичних інерційних параметрів гідроліній.....	241

ЧАСТИНА III. ГІДРАВЛІЧНІ АМОРТИЗАТОРИ, ІМІТАЦІЙНЕ	
МОДЕЛЮВАННЯ ЇХ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ.....	244
Розділ 6. Конструктивні особливості гідравлічних амортизаторів.....	244
6.1. Гідравлічні амортизатори залізничних вагонів та вагонів метрополітену.....	244
6.1.1. Конструктивна схема та загальні характеристики базової конструкції амортизатора.....	244
6.1.2. Конструкція та параметри амортизатора виробництва заводу BBW (Німеччина).....	251
6.1.3. Конструкція, геометричні параметри і дефекти деталей амортизаторів заводу RAWA (Угорщина).....	259
6.1.4. Амортизатор коливань кузовного рівня підвищення вагонів метрополітену.....	264
6.1.5. Амортизатор коливань буксового рівня підвищення вагонів метрополітену.....	271
6.2. Гідравлічні амортизатори електровозів та тепловозів.....	275
6.2.1. Конструкція амортизатора типу ТВ.....	275
6.2.2. Амортизатори коливань типу Н8.....	280
6.2.3. Амортизатор коливань фірми КОНІ.....	284
6.2.4. Амортизатор коливань фірми БОГЕ.....	289
6.2.5. Гідравлічні амортизатори коливань електровозів фірми АСЕА.....	293
6.2.6. Амортизатор коливань КТЗ тепловозів ТЕП70, ТЕП75.....	297
Розділ 7. Імітаційне моделювання робочих процесів амортизатора.....	303
7.1. Стохастичні математичні моделі гідравлічних характеристик окремих вузлів амортизатора.....	303
7.1.1. Загальні питання визначення характеристик окремих вузлів амортизатора.....	303
7.1.2. Нелінійна характеристика вузла верхнього клапана.....	305
7.1.3. Опис гідравлічної характеристики клапана за допомогою стохастичної логічної функції та її структурна математична модель.....	307
7.1.4. Структурні стохастичні моделі, які визначають окремі ділянки характеристики клапана.....	308
7.1.5. Статична характеристика клапана при роботі його в режимі дроселювання та її математична модель.....	309
7.1.6. Гідравлічна характеристика нижнього клапанного вузла.....	312
7.1.7. Гідравлічні характеристики зазору між напрямною втулкою і штоком.....	314
7.2. Математична модель гідравлічної частини амортизатора.....	317
7-2.1 Розрахункова схема та модель замкненого гідравлічного ланцюга амортизатора.....	317

7.2.2 Рівняння течії рідини та структурні математичні моделі інерційних параметрів окремих вузлів амортизатора.....	319
7.2.3 Математичні моделі деформативних процесів у поршневій і штоковій порожнині амортизатор.....	321
7.2.4 Опис термодинамічних процесів стиску газорідинної суміші в порожнині корпусу амортизатора та структурні моделі термодинамічних процесів.....	323
7.2.5 Загальна структурна математична модель гідравлічної системи амортизатора.....	326
7.3. Теоретичне обґрунтування імітаційного моделювання переміщення штока амортизатора, яке відповідає реальним умовам експлуатації.....	328
7.3.1 Принцип побудови імітаційної математичної моделі динамічної системи вагона.....	328
7.3.2. Базова математична модель, яка визначає складову переміщення штока від дії збурення в окремому колесі, частотна форма моделі.....	332
7.3.3. Імітація динамічних процесів, обумовлених детермінованими усталеними діями в колісній парі вагона.....	335
7.3.4. Імітація динамічних процесів у динамічній системі вагона обумовлена перехідними детермінованими процесами.....	337
7.3.5. Імітація динамічних процесів, обумовлених стохастичними збуреннями в колісній парі вагона.....	340
7.3.6. Елементи аналізу випадкових вихідних параметрів динамічної системи вагона.....	343
7.3.7. Формування випадкового переміщення штока амортизатора із типового вхідного сигналу у вигляді “білого” шуму.....	345
7.3.8. Загальна структурна імітаційна модель переміщення штока амортизатора, верифікація, засоби контролю.....	346
7.4. Імітаційне моделювання амортизатора.....	349
7.4.1. Загальна постановка задачі, блок-схема моделі.....	349
7.4.2. Імітаційне моделювання нелінійних сил тертя в напрямній втулці.....	351
7.4.3. Сили тертя в ущільненнях, загальна стохастична модель сил тертя в амортизаторі.....	355
7.4.4. Моделювання інтегральних дисипативних процесів амортизатора	357
7.4.5. Апробація стохастичної імітаційної математичної моделі амортизатора.....	359
7.4.6. Імітаційне моделювання інтегральних дисипативних характеристик амортизатора.....	363

ЧАСТИНА IV. СИСТЕМИ ПРИВОДІВ СТЕНДОВОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ДІАГНОСТИЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ АМОРТИЗАТОРІВ.....	366
Розділ 8. Стендове обладнання для визначення пружно-дисипативних характеристик амортизаторів.....	366
8.1. Схеми і конструктивна реалізація стендового обладнання.....	366
8.1.1. Загальні питання функціонального забезпечення діагностичних випробувань гідравлічних амортизаторів, реалізовані в розробленому стендовому обладнанні.....	366
8.1.2. Компонівка стенда для визначення пружно-дисипативних характеристик амортизаторів.....	367
8.1.3. Реалізація стендового обладнання у вигляді натурального зразка стенда.....	370
8.1.4. Гідросистема стенда для випробувань амортизаторів.....	373
8.1.5. Конструктивна реалізація силового гідроциліндра.....	375
8.1.6. Конструктивна реалізація золотникового поворотного дроселюючого гідророзподільника за базовою схемою.....	376
8.1.7. Конструктивна реалізація золотникового дроселюючого гідророзподільника з торцевим підводом рідини.....	377
8.2. Характеристики окремих агрегатів стендового обладнання із врахуванням випадкових змін параметрів.....	378
8.2.1. Режими руху приводу.....	378
8.2.2. Опис зміни режимів руху поршня приводу за допомогою логічної стохастичної математичної моделі.....	381
8.2.3. Параметри приводу, які відповідають різним режимам руху поршня.....	382
8.2.4. Геометричні характеристики дроселюючого гідророзподільника.....	384
8.2.5. Випадкові зміни геометричних параметрів дросельних отворів гідророзподільника.....	386
8.2.6. Математична модель гідророзподільника.....	388
8.3. Математична модель стендових випробувань амортизатора.....	392
8.3.1. Загальна блочна математична модель приводу стендового обладнання.....	392
8.3.2. Математична модель правої гілки гідроприводу.....	394
8.3.3. Математична модель режиму гальмування поршня.....	395
8.3.4. Загальна модель правої частини гідросистеми.....	396
8.3.5. Структурні моделі для розрахунку випадкових дисипативних та деформативних параметрів приводу.....	397
8.3.6. Математична модель лівої гілки гідросистеми.....	398
8.3.7. Структурні математичні моделі гідромагістралей приводу	400
8.3.8. Математична модель рівноваги сил на поршні гідроциліндра.....	402

8.3.9. Математична модель сил тертя в гідроциліндрі.....	403
8.3.10. Загальна структурна математична модель приводу.....	404
8.3.11. Результати математичного моделювання і порівняння їх з експериментальними даними.....	405
Розділ 9. Застосування методів спектрального аналізу процесів при діагностичних випробуваннях гідравлічних амортизаторів.....	407
9.1. Обґрунтування методів, теоретичні основи спектрального аналізу.....	407
9.1.1. Якісний аналіз діаграм “сила-переміщення” при діагностичних випробуваннях амортизатора.....	407
9.1.2. Особливості опису діаграми в полярній системі координат.....	411
9.1.3. Ряди Фур’є. Загальні положення.....	412
9.1.4. Ряди Фур’є для симетричних і кососиметричних процесів.....	414
9.1.5. Ряди Фур’є для функцій довільного періоду.....	416
9.1.6. Ряди Фур’є для процесів нескінченного періоду, інтеграл Фур’є.....	417
9.1.7. Ряди Фур’є в комплексній формі.....	419
9.1.8. Комплексна форма інтеграла Фур’є.....	420
9.2. Елементи гармонічного та спектрального аналізу кругової діаграми амортизатора.....	422
9.2.1. Гармонічний аналіз, система відліку у вигляді нульової гармоніки.....	422
9.2.2. Перша гармоніка розкладу, початкова фаза гармоніки.....	423
9.2.3. Друга гармоніка розкладу. Еліпсоїдальна діаграма.....	427
9.2.4. Гармоніки порядку вище другого, деформації діаграм.....	429
9.2.5. Спектральний аналіз процесів, лінійчастий спектр коефіцієнтів ряду Фур’є.....	432
9.2.6. Спектр амплітуд і початкових фаз процесу. Спектр комплексних коефіцієнтів ряду та спектр потужності.....	433
9.3. Специфіка застосування спектрального аналізу для розривних процесів.....	436
9.3.1. Типові розривні циклічні процеси та їх опис рядами Фур’є.....	436
9.3.2. Особливості поведінки ряду Фур’є в точці розриву процесу (явище Гібса).....	438
9.3.3. Прояв явища Гібса на круговій діаграмі.....	440
9.3.4. Шляхи компенсації негативних наслідків явища Гібса.....	442
9.3.5. Похибка визначення процесів та їх наслідок у виді некоректно поставленої задачі стосовно безкінечного ряду Фур’є.....	444
9.3.6. Похибки коефіцієнтів ряду Фур’є неточно заданого процесу.....	446
9.3.7. Наслідки некоректно поставленої задачі стосовно ряду Фур’є, регуляризація задачі.....	447
9.4. Спектральний аналіз діаграми “сила-переміщення”.....	448
9.4.1. Складові діаграми як циклічні процеси з нечітко визначеним періодом.....	448

9.4.2. Приведення процесів переміщення поршня і зусилля на штоці до строго періодичних.....	451
9.4.3. Знаходження коефіцієнтів ряду Фур'є для зусилля на штоці амортизатора.....	453
9.4.5. Розклад в ряд Фур'є переміщення штока амортизатора від часу.....	458
9.4.6. Спектральні складові діаграми “сила-переміщення”.....	462
Розділ 10. Сучасні технологічні методи керування геометричними параметрами нежорстких деталей гідрообладнання.....	466
10.1 Фактори, що впливають на якість нежорстких деталей.....	466
10.1.1. Залишкові напруження як найважливіший фактор зміни геометричних параметрів нежорстких деталей.....	466
10.1.2. Теоретичні аспекти формування залишкових напружень на основі їх фізичної сутності.....	471
10.1.3. Класифікація деталей по ступеню впливу залишкових напружень.....	474
10.1.4. Критерії оцінки конструкцій деталей по ступеню стабільності залишкових напружень.....	476
10.2. Технологічні методи стабілізації геометричних параметрів нежорстких деталей.....	478
10.2.1. Основні причини деформаційної нестабільності геометричних параметрів деталей.....	478
10.2.2. Методи термопластичного впливу.....	479
10.2.3. Методи механопластичного впливу.....	481
10.2.4. Вібробробка як резерв підвищення якості нежорстких деталей.....	482
10.3. Методи керування жолобленням.....	492
10.3.1. Запобігання жолоблення на стадії лезової обробки.....	492
10.3.2. Поверхнево-пластична обробка в системі керування точністю форми нежорстких деталей.....	494
Література.....	506